

Diagram illustrating a fire compartment model with the following parameters and labels:

- H_{rom} : Total height of the compartment.
- $H_{sil\ røyklag}$: Height of the smoke layer.
- $Vol\% CO$ and $Vol\% CO_2$: Volume percentages of carbon monoxide and carbon dioxide in the smoke layer.
- $T_{røyk}$ and $\rho_{røyk}$: Temperature and density of the smoke layer.
- T_{luft} and ρ_{luft} : Temperature and density of the air in the compartment.
- \dot{m}_p : Mass flow rate of the fire source.
- \dot{m}_e : Mass flow rate of the smoke exiting through the door.
- A_{golv} : Area of the floor.
- $H_{dørning}$: Height of the door.

Vår2005

HOVEDPROSJEKT

Studentens navn:

Linje & studieretning	
-----------------------	--

Oppgavens tittel:	
-------------------	--

Oppgavetekst:

Endelig oppgave gitt:	
Innleveringsfrist:	
Intern veileder	
Ekstern veileder	

Godkjent av studieansvarlig:	
Dato:	

Forord

Som avslutning av ingeniørutdannelsen, for å få bachelorgrad, må alle avgangselever levere en bacheloroppgave. Oppgaven teller 12 studiepoeng og er ment å samle trådene fra de foregående årene. Rapporten er et produkt av all tilnærmet kunnskap fra tidligere gjennomførte fag. Ved innlevering og fremføring vil studenten også ha tilegnet seg kunnskap i skriftlig og muntlig fremføring.

Prosjektet har vært svært lærerikt, både faglig og når det gjelder gruppearbeid. Etter endt skriving sitter jeg igjen med en ny og skremmende forståelse for de skader brannrøyk kan påføre samfunnet.

Rapporten er skrevet som et forslag til en mulig utvidelse av simuleringsprogrammet Argos. Rapporten kan leses uten noen spesiell kunnskap til dette programmet eller kjennskap til brann som fenomen. Men kunnskap innen disse områdene samt kunnskap innen matematikk vil gi en mer helhetlig forståelse.

Utrekningsmetodene som er beskrevet i rapporten er også lagt med som en Excel-fil.

Jeg ønsker å takke for all hjelp og støtte med gjennomføringen av prosjektet:

- Professor Torgrim Log for all støtte som intern veileder og Bjarne Paulsen Husted, DBI, som ekstern veileder
- Høgskolelektor Stefan Andersson for gode råd vedrørende utrekning av den toksikologiske effekten av brannrøyk.
- Ønsker også å takke Anne-Sofie Rikter-Svendsen for avgjørende kaffepauser når verden stoppet opp.

Haugesund den 02. mai 05

Marianne Dypå

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Tabellliste	iii
Figurliste	iii
Nomeklaturliste:	iv
Sammendrag	vi
Innledning	1
1. Argos	2
2. Utvalg av teori	4
3. Generell beskrivelse for brannvekst i et lukket rom.	5
3.1. Enkel brannkjemi	5
3.2. Brannforløpet steg for steg	6
4. Toksikologisk effekt av komponenter i brannrøyk	9
4.1. Giftvirkning av karbonmonoksid, CO	9
4.2. Giftvirkning av karbondioksid, CO ₂	10
5. Modelering av CO ₂ - og CO produksjon i underventilert brann.	11
5.1. Før overtenning	11
5.2. Røyktemperatur	15
5.3. Den toksikologiske effekten før overtenning	17
5.4. Beregninger og resultater før overtenning	19
5.5. Definisjon av overtenning	21
5.6. Etter overtenning	21
5.6.1. Kinnetikk (E_A og ΔG):	22
5.7. Resultater etter overtenning	25
6. Konklusjon	26
Referanser	27
Vedleggsliste	29

Tabellliste

Tabell 1: Effekt av karbonmonoksid på mennesker [2]	9
Tabell 2: Dose COHb for bevisløshet.	9
Tabell 3: Effekt av karbondioksid på mennesker. [8]	10
Tabell 4: Properties of inorganic compounds. [9]	23

Figurliste

Figur 1: To-sone modell i et lukket lokale. [5]	2
Figur 2: Grafer fra Argos.	2
Figur 3: Oppbygging av varmt røyklag. [5]	6
Figur 4: Ventilasjon av røyk fra brannrom.	7
Figur 5: Røykventilasjon som funksjon av ekspanderende gasser.	8
Figur 6: Enkel røykfyllings modell med liten lekkasje ved gulv. [5]	11
Figur 7: CO utbytte som en funksjon av den globale ekvivalensraten. [5]	14
Figur 8: Oppdriftsplume. [5]	15
Figur 9: Aktiveringenergi.	22

Nomeklaturliste:

A	Frekvensfaktor.	[s ⁻¹]
A _f	Overflatearealet til brenselet.	[m ²]
b	Likningskonstant, gitt ut fra kjemisk reaksjon.	
c _p	Varmekapasitet.	[kJ/(kgK)]
D	Dødelig dose.	
D'	Uttrykk for konsentrasjon gitt av Stewart.	
E _A	Aktiveringsenergi.	[kJ/mol]
FED	Fractional Effective dose.	
g	Gravitasjonskonstanten.	[9,81 m/s ²]
h	Spesifikk entalpi.	[J/kg]
H	Romhøyde.	[m]
m	Masse	[kg]
\dot{m}	Masserate.	[kg/s]
\dot{m}_{air}	Masserate luft.	[kg/s]
\dot{m}_e	Masserate av gasser ut gjennom ventilasjonsåpninger.	[kg/s]
\dot{m}_{fuel}	Masserate brensel.	[kg/s]
\dot{m}_{ox}	Masserate oksygen	[kg/s]
\dot{m}_{out}	\dot{m}_e	
\dot{m}_p	Masserate for brannplume.	[kg/s]
MW _{avg}	Gjennomsnittlig molarvekt. (Settes lik molarvekt for luft.)	[g/mol]
MW _i	Molarvekt til gitt forbrenningsprodukt.	[g/mol]
q _c	Varmeenergi.	[kJ]
Q	Energi	[kJ]
\dot{Q}	Varmeproduksjons rate.	[kW]
\dot{Q}^*	Dimensjonsløs varmeproduksjon.	[-]
r	Støkiometrisk forhold mellom brensel og luft.	[-]
R	Gasskonstanten.	[J/(molK)]
RMV	Respiratory Minute Volum som funksjon av %CO ₂	[L/min]
RMV ₀	Resoiratory Minute Volum.	[L/min]
S	Gulvareal	[m ²]
t	Tid.	[s]
T	Temperatur	[K]
T _a	Ambient luft temperatur.	[K]

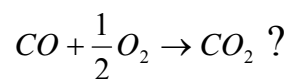
T_g	Temperatur røyklag.	[K]
T_{ut}	Røyktemperatur ut av brannrommet	[K]
T_{inn}	Lufttemperatur inn i brannrommet	[K]
V	Volum	[m ³]
\dot{V}_{ut}	Volumetrisk masserate røyk ut av brannrommet	[m ³ /s]
\dot{V}_{inn}	Volumetrisk masserate luft inn i brannrommet	[m ³ /s]
v_n	Røykens hastighet ut av brannrommet.	[m/s]
W	Utført arbeid	[J]
X_i	Volumprosent av gitt forbrenningsprodukt.	[%]
y	Dimensjonsløs høyde.	[-]
y_{co}	Forbrenningsytbytte av CO.	[g/g]
Y_i	Forbrenningsutbytte.	[g/g]
$Y_{O_2,\infty}$	Maksimalt forbrenningsutbytte av oksygen.	[g/g]
y_n	Dimensjonsløs høyde påfølgende tidssteg.	[-]
z	Høyde fra gulv til røyklag.	[m]
z_n	Høyde fra gulv til røyklag påfølgende tidssteg	[-]
Greske symboler:		
α	Brannvekst faktor.	[-]
Δ	Differanse.	
ΔG	Gibbs Fri Energi.	[J/mol]
Δh	Entalpi.	[J/mol]
ΔH_c	Forbrenningsvarme	[kJ/kg]
ΔS	Entropi.	[J/(molK)]
Σ	Sum.	
κ	Hastighetskonstant for reaksjon	
ρ	Massetetthet	[kg/m ³]
ρ_a	Massetetthet for luft ved ambient temperatur	[kg/m ³]
ρ_g	Massetetthet for brannrøyk.	[kg/m ³]
τ	Dimensjonløs tid.	[-]
Φ	Ekvivalens rate.	[-]
X	Forbrennings effektivitet	[0< χ <1]
Ψ	Forbrenningsutbytte som funksjon av ekvivalensraten.	[g/g]
ψ_{O_2}	Forbrenningsutbytte av oksygen som en funksjon av ekvivalensraten.	[g/g]

Sammendrag

Formålet med oppgaven var å sette opp en modell som kan benyttes for å bestemme mengden av CO og CO₂ til bruk i en sone-modell, i dette tilfellet er modellen tiltenkt Argos. Den matematiske modellen settes opp i Excel. Det er viktig å kunne beregne mengden giftige gasser da funksjonsbaserte krav i flere land setter krav til dette i forhold til kritiske forhold. Etter som det hovedsakelig er karbonmonoksid, karbondioksid og utarming av oksygen som dreper, er det disse gassene som er tatt med i modellen.

Før overtenning fokuseres det på hva som skjer inne i brannrommet. Modellen beregner da om det oppstår underventilerte forhold og hvor mye CO som produseres. Modellen setter blant annet opp resultater for nedfyllingstid, røyktemperatur, produksjon av CO og utarming av oksygen. Mengde og type brensel samt tilgang på oksygen avgjør resultatene. Tidspunkt for når kritiske forhold oppstår er en funksjon av disse kriteriene.

Etter overtenning vurderes det hva som skjer med røyken når den forlater brannrommet. Ved bruk av kinetikk, Gibbs Fri Energi og Aktiveringsenergi, vurderes det om karbonmonoksidet vil reagere videre med oksygen til karbondioksid.



Beregninger av forskjellige reaksjoner som går fra CO til CO₂ er ikke entydige. Erfaringsmessig vet man at brannrøyken er farlig også for folk som oppholder seg i andre deler av huset. Dette er et område som vil kreve mer undersøkelse før en sikkert kan si hvordan CO reagerer utenfor brannrommet.

Innledning

Røyk er det brannproduktet som tar flest liv og gjør store skader på gjenstander og bygninger. Røyk kan defineres på flere måter, de to vanligste definisjonene er:

- Røyk = forbrenningsprodukter fra brann.
- Røyk = forbrenningsprodukter + luft som blandes inn i brannplumen.

I rapporten vil røyk bli definert kun som den mengden luft som blandes inn i brannplumen. Det blir ikke tatt hensyn til massen av forbrenningsproduktene da den ikke utgjør noe nevneverdig av det totale røykvolumet.

Forståelse for produksjon av toksiske elementer i brannrøyk er svært viktig, da røyk er et brannprodukt som gjør store skader på gjenstander og bygninger, og samtidig er det produktet som tar flest liv.

Brannrøyk inneholder flere forbrenningsprodukter som kan skape en livstruende atmosfære, røyken kan inneholde både bedøvende og irriterende gasser. Den gassen som oftest fører til dødsfall er karbonmonoksid (CO). Men røyk inneholder også andre gasser slik som karbondioksid (CO₂), blåsyre (HCN) og saltsyre (HCl), alle disse gassene vil påvirke en person som inhalerer brannrøyken. Røyk vil også føre til redusert sikt noe som fører til at det tar lengre tid å rømme. Dette resulterer i lengre eksponeringstid for den giftige røyken.

Brannrøyk skader ved at det inhaleres giftig røyk eller ved at varm røyk skader luftveiene og lungene.

Undersøkelser viser at så mange som 50 % av alle dødsfall som er brannrelatert skyldes karbonmonoksid-forgiftning. [1]

Forbrenningsproduktene som oppstår som et resultat av en brann er avhengig av tilgangen på oksygen.

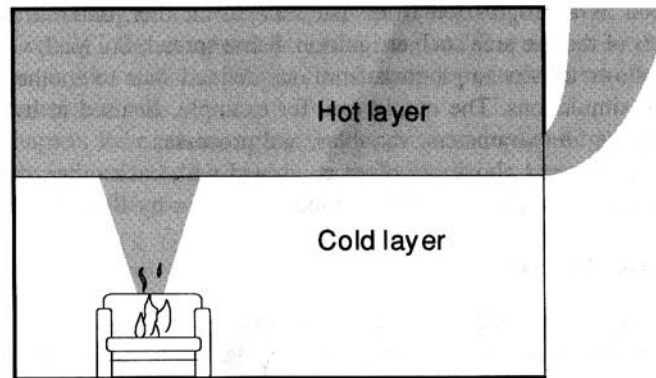
Det er derfor viktig å kunne beregne hvor mye røyk som vil bli produsert i gitte situasjoner, samt hvilke produkter røyken inneholder og den toksikologiske effekten av røyken.

Denne rapporten tar for seg produksjonen av karbonmonoksid og karbondioksid i et brannrom. Modellen ser på hvordan CO produksjonen endrer seg etter som brannen går fra å være overventilert til å bli underventilert. Den ser også på hva som skjer med de forbrenningsproduktene som forlater brannrommet etter overtenning.

1. Argos

Argos er et dataprogram som er utviklet av Dansk Brand- og sikningsteknisk Institut i samarbeid med danske myndigheter og forsikringsselskaper. Den første versjonen kom ut i 1990. Argos ble registret som varemerke i januar 2003.

Argos er et simuleringsprogram som baserer seg på en tosonemodell.

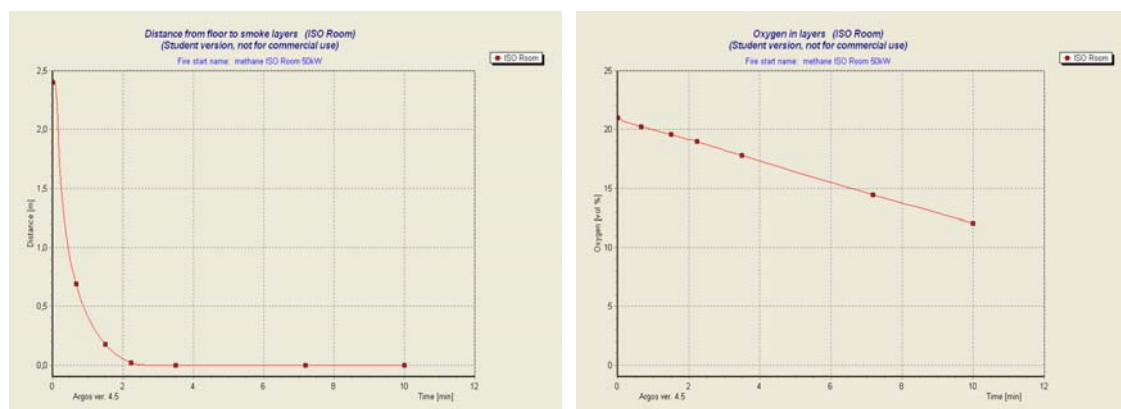


Figur 1: To-sonemodell i et lukket lokale. [6]

For at simuleringsprogrammet skal virke er det flere forutsetninger som er lagt til grunn. Eksempler er antennelseskilder, branneeffekten, arealkonstanter, åpninger mellom rom og materialeegenskapene. De fleste verdiene her er svært konservative, slik at utviklingen går hurtigere enn den ville gjort i praksis. Der er lagt inn konstanter knyttet til de forskjellige materialenes egenskaper ved varmepåvirkning.

Argos er en tosonemodell som brukes for å simulere brann på et begrenset område.

Argos beregner temperaturer, røykkonsentrasjoner og høyde på røyklag i modeller bestående av opp til fem rom. Resultatene fremstilles grafisk.



Figur 2: Grafer fra Argos.

Argos er bygd opp slik at hvert rom blir delt opp i en eller to soner. Et lag med kalde gasser nederst og et varmt lag med varme gasser bestående av forbrenningsprodukter og luft. Programet antar at brannen er brenselkontrollert før flashover.

Det er også lagt inn verdier for tiltak som kan utføres, eksempelvis automatisk brannalarm anlegg, røykventilering og sprinkling. Dette er faktorer som kan påvirke situasjonen ved en reell brann, og det er da estimert inn verdier for dette i Argos.

I tillegg til å estimere forskjellige verdier for temperatur og røyk, er der også lagt inn konstanter for overtenning, oksygennivå og materialberegning. Dette er da knyttet til når det blir kritiske forhold for mennesker i en gitt simulering. Programmet ser også på spredningsmulighetene for røyk.

Programmet har også flere begrensinger. Verdiene som blir benyttet, for å simulere en brann, er konservative, således også da resultatene. Videre er verdiene for antennelse lagt inn slik at alt materialet som er definert inn som det brennbare materialet antenner samtidig, noe som påvirker både temperatur og røykproduksjon. Resten av rommet blir ikke påvirket av brannen før en eventuell overtenning finner sted.

En fysisk begrensning som er lagt inn, er at simuleringen ikke kan inneholde mer enn 5 rom. Dette gjør det vanskelig å kunne benytte programmet i større og mer komplisert sammensatte bygninger. Videre er det ikke lagt inn mulighet for at brannen kan påvirkes av personer, både når det gjelder varsling og eventuell slokking.

Som alle dataprogram, er Argos laget av mennesker, med den kunnskapen som besittes av dem som programmerer de forskjellige scenarioene. Dette gjør at det ikke forekommer noen overraskelser underveis, noe som skjer i reelle branner.

2. Utvalg av teori

Rapporten går gjennom en metode for å beregne CO og CO₂ produksjon i en underventilert brann til bruk i en sonemodell. Brannen er delt i to deler, før og etter overtenning.

Utgangspunktet for søken etter teori startet med teorimanualen til Argos, det ble også lagt vekt på referanselisten.

Det er også benyttet faglitterære bøker:

- Enclosure Fire Dynamics; Björn Karlsson og James G. Quiniere.
- An Introduction to Fire Dynamics; Dougal Drysdale

Søkemotorer på internett.

- ISI web of science".
- ScienceDirect.
- Directory of Open Access Journals.

I tillegg ble det søkt i artikkelarkivene til

- "National Institutes of Standards and Technology",
- "Norsk brannteknisk laboratorium" og
- "National Transport Safety Board".

Eksempel på ofte brukte søkeord:

- Karbonmonoksid.
- Karbondioksid.
- Underventilert/overventilert brann.
- Utbytte.
- Før/etter overtenning.
- Global ekvivalens rate.

3. Generell beskrivelse for brannvekst i et lukket rom.

3.1.Enkel brannkjemi

For at det skal kunne oppstå en brann må følgende være tilstedet:

- Brensel
- Luft/oksygen
- Varme (energi, tennkilde)
- Kjemiske reaksjonskjeder

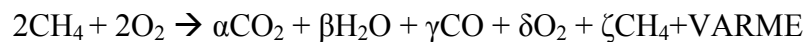
Brensel har fire forskjellige agregattilstander:

- Gass
- Væske
- Fast stoff

Faste stoffer må tilføres tilstrekkelig energi til at materialet smelter og så fordamper da det er de brennbare gassene som reagerer med oksygen.

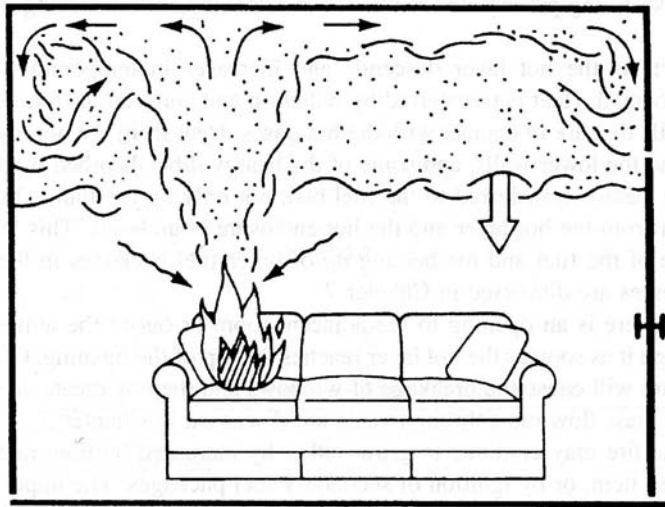
For at en gass skal kunne brenne må det være oksygen til stede. Det er vanlig å dele branner opp i fullstendig forbrenning (brensel og oksygen blir brukt opp), brenselsfattig brann (det er mer enn nok oksygen til stede) og brenselsrik eller underventilert brann (det er underskudd på oksygen)

I en underventilert brann er det ikke nok oksygen til at alt brenselet kan reagere fullt ut og det lages andre produkter enn ved fullstendig forbrenning. En underventilert brann lar seg ikke så lett løses støkiometrisk, det benyttes ofte empiriske data for dette.



En brann er aldri et entydig fenomen. Brannforløpet er avhengig av blant annet brenselstype, mengde, rommets geometri, overflater og ventilasjon. [5]

3.2. Brannforløpet steg for steg



Figur 3: Oppbygging av varmt røyklag. [6]

Antennelse:

Etter antennelsen vokser brannen noe som fører til at energiproduksjonen vokser, dette skyldes for det meste at flammen vokser. Til å begynne med er de fleste branner brenselkontrollert og rommets geometri har ingen innvirkning på brannen. I tillegg til energi produseres det også gasser og sot partikler.

Brannplum:

De varme gassene i en brann er omgitt av kalde gasser. De varme forbrenningsproduktene har mindre tetthet enn de kalde gassene, og vil derfor stige pga oppdriften.

Når de varme gassene stiger får en innblanding av kald luft i brannplumen. Etter som blandingen av forbrenningsprodukter og luft når taket bygges det opp et lag av varme gasser. Bare en liten del av massen i det varme røyklaget er forbrenningsprodukter. Største parten av volumet består av innblandet luft.

Gasstemperatur:

Det er vist eksperimentelt at det i situasjoner med brann i et lukket rom at rommet vil bli delt opp i to lag, et varmet lag øverst som består av forbrenningsprodukter og innblandet luft og et kaldere lag underst som består av luft. Andelene gass i de forskjellige lagene forandrer seg som en funksjon av tiden, med det er antatt at gassenes fordeling er uniform gjennom hele laget.

Det varme laget:

Det foregår innblanding av kald luft i brannplumen i hele brannforløpet, på denne måten fraktes luften opp mot taket og blandes inn i det øverste laget. På grunn av dette øker det øverste laget i volum, og skillet mellom de to lagene flytter seg nedover mot gulvet.

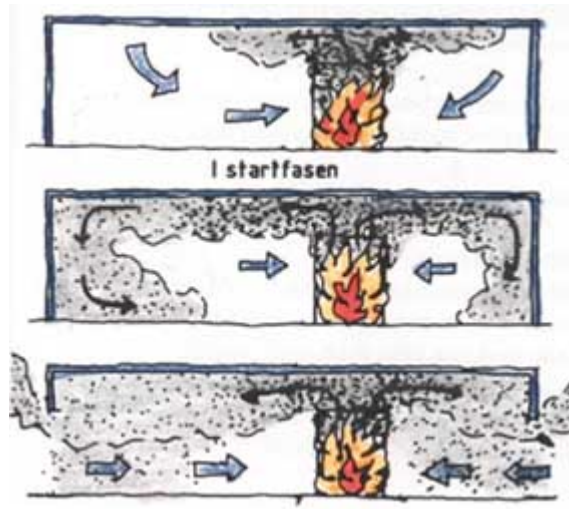
Varmetransport:

Etter som det varme laget vokser og temperaturen i laget øker, øker også varmetransporten. Varmetransporten foregår gjennom stråling og konveksjon mellom det varme laget og det deler av rommet som er i kontakt med laget. Varmestrålingen fører også til at temperaturen i

det nedenforliggende laget øker. Tilbakestrålingen til brenselet vil også inkludere tilbakestrålingen fra det varme røyklaget, ikke bare fra flammen. Dette fører til at massefluksen øker og brannen øker.

Ventilasjon:

Dersom det er ventilasjonsåpninger i rommet vil det sive varm røyk ut av disse så snart røyklaget rekker ned til disse. Dersom det er vinduer vil ofte temperaturforskjellene inne og ute føre til at disse sprekker/knuser og det skapes nye ventilasjonsåpninger.



Figur 4: Ventilasjon av røyk fra brannrom.

Overtenning:

Etter som brannen øker og det øvre laget vokser, øker også temperaturen i rommet. Tilbakestrålingen fra røyken fører til at møbler og brennbare flater i rommet pyrolyserer og det kan oppstå en situasjon hvor alle brennbare flater i rommet antenner, noe som fører til en enorm økning i varmeproduksjonen. Denne situasjonen kalles overtenning.

Fullt utviklet brann.

Ved en fullt utviklet brann kan en se flammetunger som kommer ut av brannrommets åpninger. I en slik situasjon er brannen som oftest underventilert, men brannen kan allikevel brenne i flere timer dersom frisk luft kan komme til.

Oksygenunderskudd:

Dersom det ikke er ventilasjonsåpninger i brannrommet vil det resultere i at det varme laget bevege seg nedover til det helt eller delvis dekker flammen. Etter som oksygenprosenten i rommet synker kan det være at brannen dør ut på grunn av oksygenmangel. Selv om RHR synker kan det fortsatt foregå en pyrolysereaksjon i rommet, noe som kan føre til delvis forbrenning og produkter som CO og NO_x.

Trykkforskjell, volumforskjell

Dersom brannrommet kun har en ventilasjonsåpning, vil det utveksles varme branngasser og kald luft. Etter at den kalde lufta er kommet inn i rommet vil den ekspandere som funksjon av temperaturforskjellen mellom inne og ute.

$$\frac{\dot{V}_{ut}}{\dot{V}_{inn}} = \frac{T_{ut}}{T_{inn}} \quad (1)$$

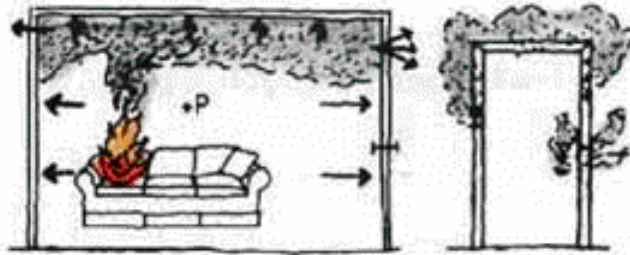
der

\dot{V}_{ut} volumetrisk masserate røyk ut av brannrommet [m³/s]

\dot{V}_{inn} volumetrisk masserate luft inn i brannrommet [m³/s]

T_{ut} Røyktemperatur ut av brannrommet [K]

T_{inn} Lufttemperatur inn i brannrommet [K]



Figur 5: Røykventilasjon som funksjon av ekspanderende gasser.

4. Toksikologisk effekt av komponenter i brannrøyk.

4.1. Giftvirkning av karbonmonoksid, CO.

Karbonmonoksid er en fargeløs, luktløs og smaksløs gass som er giftig for mennesker. Gassen kommer inn i kroppen gjennom luftveiene, og blir tatt opp i blodet gjennom lungene. Den medisinske betegnelsen på dette er hypoksi. Hemoglobinet i blodet binder seg 300 ganger lettere til karbonmonoksid enn til oksygen. Karbonmonoksid fortrenger da oksygenets plass i blodet. Det dannes da carboxyhemoglobin, COHb. Karbonmonoksid er en narkotisk gass og opptak av karbonmonoksid i blodet kan føre til bevisstløshet, kvelning og død. Tabell 1 viser en oversikt over mulig effekt av forskjellige karbonmonoksidnivåer og eksponeringstid.

Tabell 1: Effekt av karbonmonoksid på mennesker [2]

50 ppm	Grenseverdi for ingen skadelig effekt
200 ppm	Mild hodepine kan inntreffe etter 2-3 timer
400 ppm	Hodepine og kvalme etter 1-2 timer
800 ppm	Hodepine, kvalme og svimmelhet etter 45 minutter; kollaps og mulig bevisstløshet etter to timer
1000 ppm	Bevisstløshet etter en time
1600 ppm (0,16%)	Hodepine, kvalme og bevisstløshet etter 20 minutter
3200 ppm (0,32%)	Hodepine og svimmelhet etter 5-10 minutter; bevisstløshet etter 30 minutter
6400 ppm (0,64%)	Hodepine og svimmelhet etter 1-2 minutter, bevisstløshet og fare for liv etter 10-15 minutter
12800 ppm (1,28%)	Umiddelbar fysiologisk effekt; bevisstløshet og fare for liv etter 1-3 minutter

Purser (1988) fant at %COHb i blodet ved bevisstløshet er avhengig av fysisk aktivitet, etter som mengden en inhalerer er avhengig av pustefrekvensen som endres etter om en for eksempel sover eller jobber, se Tabell 2.

Tabell 2: Dose COHb for bevisstløshet. [8]

Aktivitet	RMV ₀ (L/min)	Dose for tap av bevissthet. (D _{CO}) %COHb
Hvile	8,5	40
Lett arbeid	25	30
Tungt arbeid	50	20

4.2. Giftvirkning av karbondioksid, CO₂.

Karbondioksid er en av de mindre giftige gassene som produseres i et bannforløp, men gassen er med på å styre menneskets pustefrekvens. Allerede ved opptak av små konsentrasjoner vil pustefrekvensen øke, noe som resulterer i at en i større grad får i seg andre giftige branngasser slik som CO. Gassen vil bli transportert rundt med blodet, og oksygenmetningen i blodet synker, men i motsetning til karbonmonoksid prøver kroppen å kompensere for oksygenmetningstapet så lenge det er mulig, noe som resulterer i økt pustefrekvens. Økt pustefrekvens fører til at en får i seg større mengder av den farlige røyken.

Den volumetriske pustefrekvensen endrer seg som en funksjon av %CO₂. [8]

$$RMV = RMV_0 \cdot e^{(0,2486\%CO_2)} \quad (2)^{*1}$$

der

RMV	Respiratory Minute Volum som funksjon av %CO ₂	[L/min]
RMV ₀	Resoiratory Minute Volum.	[L/min]

Utslaget av dette er at man kan få flere forskjellige symptomer som svimmelhet, kvalme og hodepine. Dette er symptomer personer kan oppleve i andre sammenhenger, og det kan da være vanskelig å finne den eksakte årsaken til disse. Påvirkede personer kan få en likegyldighetsholdning til det som skjer rundt dem, og kan dermed utsette seg selv for stor fare under en brann, fordi de ikke bryr seg om det som skjer. [3] og [4]

Tabell 3: Effekt av karbondioksid på mennesker. [9]

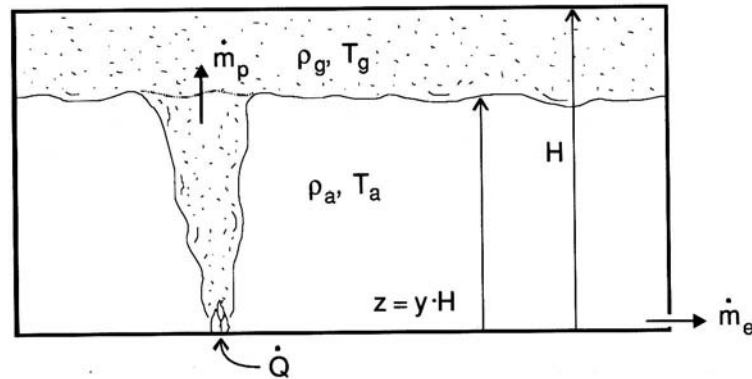
2% CO ₂ -konsentrasjon	Pustefrekvensen økes med 60%.
3% CO ₂ -konsentrasjon	Pustefrekvensen doubles i forhold til 2% CO ₂ -konsentrasjon.
5% CO ₂ -konsentrasjon	Noen personer kan oppleve pustebesvær.
>10% CO ₂ -konsentrasjon	Kan true menneskers evne til å rømme fra brann ved egen hjelp.

¹ Likningsnummer merket med * er benyttet i beregningsmodell.

5. Modelering av CO₂- og CO produksjon i underventilert brann.

5.1.Før overtenning

Benytter en modell av et rom med liten lekkasje i gulvhøyde for å sette opp en modell av en brann i et underventilert rom.



Figur 6: Enkel røykfyllings modell med liten lekkasje ved gulv. [6]

Rommet har høyden H og høyden fra gulv til røyklag har høyden Z, begge med enhet meter. Brannen er en punktkilde med varmeproduksjon \dot{Q} , masseraten fra brenselet kan neglisjeres da den er forsvinnende lite i forhold til innblandet luft i plumen, \dot{m}_p . Masse raten ut av rommet, \dot{m}_e , skyldes ekspansjon av de varme gassene. Kontrollvolumet tar ikke hensyn til volumet av plumen.

Ved å benytte seg av Zukoskis [7] modell for bevaring av masse og energi, som ser på bevaring av masse og energi på det nedre laget. Konservering av masse er gitt ved:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho dV + \iint_{CS} \rho v_n dS = 0 \quad (3)$$

der

ρ	Massetetthet	[kg/m ³]
V	Volum	[m ³]
v_n	Røykens hastighet ut av brannrommet.	[m/s]
S	Gulvareal	[m ²]

Masse forlater det nedre laget gjennom plumen, \dot{m}_p , og gjennom åpningen, \dot{m}_e . Likn. 3 kan omskrives til til likn. 4 hvor z er en funksjon av tida.

$$\frac{d}{dt} (\rho_a z S) + \dot{m}_e + \dot{m}_p = 0 \quad (4)$$

der

ρ_a	Massetetthet for luft ved ambient temperatur	[kg/m ³]
z	Høyde fra gulv til røyklag.	[m]

\dot{m}_e	Masserate av gasser ut gjennom ventilasjonsåpninger.	[kg/s]
\dot{m}_p	Masserate for brannplume.	[kg/s]

Ved å benytte Zukoski plumen, får man likn. 5 som uttrykker masseraten til plumen og likn. 6 som uttrykker massen som forsvinner ut av kontrollvolumet.

$$\dot{m}_p = 0,21 \left(\frac{\rho_a^2 g}{c_p T_a} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (5)$$

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{Q}}{c_p T_a} \quad (6)$$

der

g	Gravitasjonskonstanten.	[9,81 m/s ²]
c_p	Varmekapasitet.	[kJ/(kgK)]
T_a	Ambient luft temperatur.	[K]
\dot{Q}	Varmeproduksjons rate.	[kW]

Ved å kombinere likn.4, likn. 5 og likn. 6 får man en differensial likning som uttrykker røykfyllingstida for rommet.

$$\frac{dz}{dt} \rho_a S + \frac{\dot{Q}}{c_p T_a} + 0,21 \left(\frac{\rho_a^2 g}{c_p T_a} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} = 0 \quad (7)$$

Likn. 7 kan ikke løses analytisk, men ved å gjøre uttrykket dimensjonsløst kan det løses numerisk.

Dimensjonsløs høyde defineres som

$$y_n = \frac{z_n}{H} \quad (8)^*$$

der

y_n	Dimensjonsløs høyde påfølgende tidssteg.	[-]
z_n	Høyde fra gulv til røyklag påfølgende tidssteg	[-]
H	Romhøyde.	[m]

Dimensjonsløs varmeproduksjon defineres som

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot \sqrt{g} \cdot H^{5/2}} \quad (9)^*$$

der

\dot{Q}^* Dimensjonsløs varmeproduksjon. [-]

Dimesjonsløstid defineres som

$$\tau = t \cdot \sqrt{\frac{g}{H}} \cdot \frac{H^2}{S} \quad (10)^*$$

der

τ	Dimensjonløs tid.	[-]
t	Tid.	[s]

Ved å benytte likn.8, likn. 9 og likn.10 kan likn. 7 gjøres om til likn. 11 som uttrykker en dimensjonsløs differensiel likning for røykfyllingstida til rommet.

$$\frac{dy}{d\tau} + \dot{Q}^* + 0,21 \cdot (\dot{Q}^*)^{1/3} \cdot y^{5/3} = 0 \quad (11)$$

Likn. 11 kan løses numerisk for å se hvordan den differensielle likningen forandrer seg over tid.

$$dy = -(\dot{Q}^* + 0,21(\dot{Q}^*)^{1/3} y^{5/3}) d\tau \quad (12)$$

$$\Delta y = -(\dot{Q}^* + 0,21(\dot{Q}^*)^{1/3} y^{5/3}) \Delta \tau \quad (13)$$

$$y = y_n \quad (14)$$

$$y_{n+1} = y_n + \Delta y \quad (15)$$

$$y_{n+1} = y_n - (\dot{Q}^* + 0,21(\dot{Q}^*)^{1/3} y_n^{5/3}) \Delta \tau \quad (16)^*$$

For varmeproduksjonen, \dot{Q} , kan eksempelvis likn.17 eller likn. 18 benyttes.

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m} \cdot \chi \cdot \Delta H_c \quad (17)^*$$

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad [17](18)^*$$

der

A_f	Overflatearealet til brenselet.	[m ²]
\dot{m}	Masserate.	[kg/s]
χ	Forbrennings effektivitet	[0< χ <1]
ΔH_c	Forbrenningsvarme	[kJ/kg]
α	Brannvekst faktor.	[-]

Produksjonen av CO kan beregnes som en funksjon av den globale ekvivalensraten. Gottunk og Roby foreslår følgende sammenheng mellom CO utbytte per gram forbrent brensel og ekvivalensraten.

$$y_{co} = 0 \quad \text{for } \phi < 0,5 \quad (19)^*$$

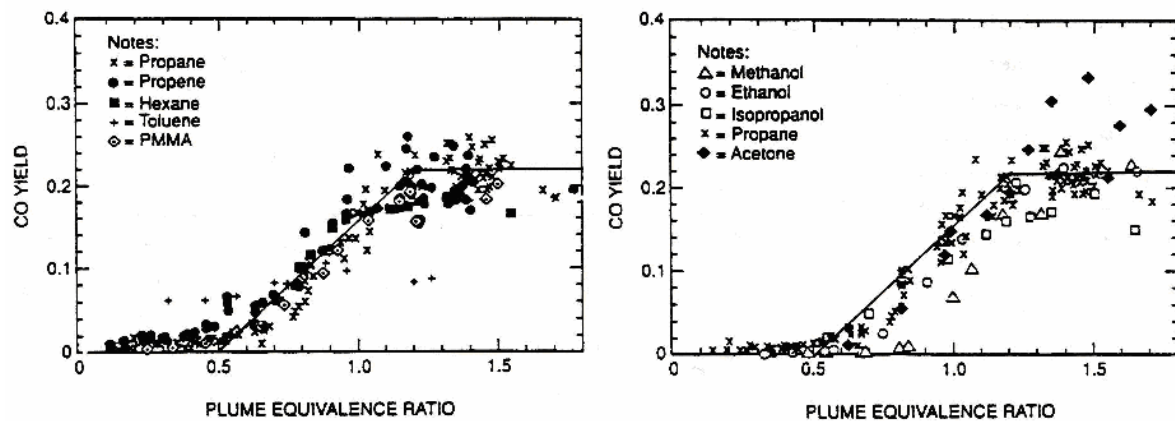
$$y_{co} = 0,3 \cdot \phi - 0,15 \quad \text{for } 0,5 < \phi < 1,2 \quad (20)^*$$

$$y_{co} = 0,21 \quad \text{for } \phi > 1,2 \quad (21)^*$$

der

y_{co}	Forbrenningsytbytte av CO.	[g/g]
Φ	Ekvivalens rate.	[-]

Gottunk og Roby baserte denne fremgangsmåten på forsøk, se Figur 7.



Figur 7: CO utbytte som en funksjon av den globale ekvivalensraten. [6]

Den globale ekvivalensraten viser forholdet mellom masserate for brenselet og masserate for oksygenet, normalisert med det støkiometriske forholdet mellom brensel og oksygen.

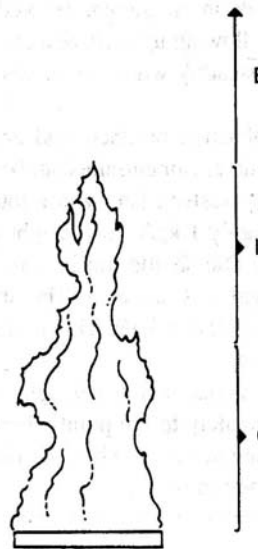
$$\phi = \frac{\dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{ox}}{(\dot{m}_{fuel} / \dot{m}_{ox})_{stoich}} \quad (22)^*$$

der

\dot{m}_{fuel}	Masserate brensel.	[kg/s]
\dot{m}_{ox}	Masserate oksygen	[kg/s]

Er $\Phi > 1$ er brannen underventilert, og ved $\Phi < 1$ er den overventilert.

Innblandingen av varm luft inn i det varme røyklaget finnes ved å benytte McCaffreys (1983) empiriske uttrykk for brannplum. McCaffrey deler brannplumen inn i tre områder.



Oppdriftsplume:

$$\frac{\dot{m}}{q_c} = 0,124 \cdot \left(\frac{z}{q_c^{0,4}} \right)^{1,895} \quad \text{for } 0,20 < \frac{z}{q_c^{0,4}} < \infty \quad (23)^*$$

Pulserende flamme:

$$\frac{\dot{m}}{q_c} = 0,026 \cdot \left(\frac{z}{q_c^{0,4}} \right)^{0,909} \quad \text{for } 0,08 < \frac{z}{q_c^{0,4}} < 0,20 \quad (24)^*$$

Kontinuerlig flamme

$$\frac{\dot{m}}{q_c} = 0,011 \cdot \left(\frac{z}{q_c^{0,4}} \right)^{0,566} \quad \text{for } 0 < \frac{z}{q_c^{0,4}} < 0,08 \quad (25)^*$$

Figur 8: Oppdriftsplume. [6]

der

\dot{m}	Masserate.	[kg/s]
q_c	Varmeenergi.	[kJ]

McCaffrey-plumen gir mengden luft som blir fraktet fra det kalde til det varme laget. For å få mengden oksygen som transporteres må McCaffrey plumen multipliseres med en faktor 0,23. (21 vol% O₂ i luft tilsvarer 23 vekt%)

5.2. Røyktemperatur.

Temperaturen i det varme laget lar seg estimere ved å anta at det øvre laget etter en gitt tid vil ha lik temperatur og tetthet i hele laget. Den totale massen til det øvre laget vil da være:

$$m = \rho_g V = \rho_g S(H - z) = \rho_g SH(1 - y) \quad (26)$$

der

m	Masse	[kg]
ρ_g	Massetetthet for brannrøyk.	[kg/m ³]

$$Q - W = m\Delta h \quad (27)$$

$$\Delta h = c_p (T_g - T_a) \quad (28)$$

der

Q	Energi	[kJ]
W	Utført arbeid	[J]
ΔH	Entalpi.	[J/mol]
T_a	Ambient luft temperatur.	[K]
T_g	Temperatur røyklag.	[K]

Ved å sette sammen likn. 26 med likn. 27, termodynamikkens første lov, og likn. 28, forandringen i entalpi, får man et uttrykk som tar hensyn til både røyktemperaturen og tettheten til røyken.

$$\dot{Q}t = \rho_g SH(1-y)c_p(T_g - T_a) \quad (29)$$

Likn. 29 uttrykker den termiske tilstanden til massen i det øvre røyklaget ved hjelp av T_g og ρ_g . Ved hjelp av den ideelle gassloven, $T_g\rho_g = T_a\rho_a$, kan likn. 29 omskrives til:

$$\dot{Q}t = SH(1-y)c_p T_a (\rho_a - \rho_g) \quad (30)$$

Det er ønskelig å beregne likn 30 ut fra de dimensjonsløse størrelsene \dot{Q}^* og τ . Sammenhengen mellom $\dot{Q}t$ og $\dot{Q}^*\tau$ kan finnes ved å benytte likn. 9 og likn. 10.

$$\dot{Q}t = \dot{Q}^* \tau \rho_a c_p T_a HS \quad (31)$$

Ved å kombinere likn. 31 og likn. 29 får man et dimensjonsløst uttrykk som kan løses med hensyn på ρ_g .

$$\dot{Q}^* \tau = (1-y) \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \quad (32)^*$$

Når ρ_g er bestemt kan en beregne temperaturen i røyklaget ved å sette opp tettheten til luft som en funksjon av temperatur. $\rho T = \text{konstant}$ for en ideell gass. [8]

$$\rho T = 353 \text{ kgK/m}^3 \quad \text{Konstant for luft} \quad (33)$$

$$T = \frac{353}{\rho_g} \quad \text{T vil ha enheten Kelvin} \quad (34)^*$$

5.3. Den toksikologiske effekten før overtenning

I tiden før overtenning kan den toksikologiske effekten av branngassene beregnes etter en modell som tar hensyn til blant annet konsentrasjon av giftige gasser og hvordan CO₂ påvirker pustefrekvensen.

Mengden av CO, CO₂ og O₂ i det varme røyklaget kan antas å være lik mengden tilført minus mengden som blir ventilert bort.

$$\Psi_i(\phi)\dot{m}_{fuel} = Y_i(\dot{m}_{out}) = Y_i(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}) \quad (35)$$

der

Ψ	Forbrenningsutbytte som funksjon av ekvivalensraten.	[g/g]
Y_i	Forbrenningsutbytte.	[g/g]
\dot{m}_{out}	\dot{m}_e	
\dot{m}_{air}	Masserate luft.	[kg/s]

Ved å kombinere likn. 35 med uttrykket for den globale ekvivalensraten kan en skrive om likn. 35 til:

$$Y_i = \frac{\Psi_i(\phi)}{1 + \frac{1}{\phi r}} \quad (36)^*$$

Der r er det støkiometriske brensel/oksygen forholdet.

Likn. 36 kan benyttes for å beregne utbyttet av CO og CO₂ i røyklaget. For oksygen må det benyttes et noe annet uttrykk etter som oksygen er en naturlig del av luft og kan fortrenses av andre gasser uten at det foregår en forbrenning. Oksygen balansen for røyklaget er gitt med likn. 37.

$$Y_{O_2,\infty}\dot{m}_{air} - \Psi_{O_2}(\phi)\dot{m}_{fuel} = Y_{O_2}(\dot{m}_{out}) = Y_{O_2}(\dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel}) \quad (37)$$

$Y_{O_2,\infty}$ er masse fraksjonen til oksygen i luft, ca. 0,233.

Ved å kombinere likn. 37 og uttrykket for den globale ekvivalensraten kan oksygenutbyttet i røyklaget beregnes som en funksjon av den globale ekvivalensraten.

$$Y_{O_2} = \frac{Y_{O_2,\infty}/(\phi r) - \Psi_{O_2}(\phi)}{1 + 1/(\phi r)} \quad (38)^*$$

Når utbyttet av CO, CO₂ og O₂ er beregnet kan en beregne konsentrasjonen av det forskjellige gassene ved å benytte likn.39.

$$X_i = Y_i \frac{MW_{avg}}{MW_i} \quad (39)^*$$

MW_{avg} kan settes lik molarvekta til luft, 28,97g/mol.

der

X_i	Volumprosent av gitt forbrenningsprodukt.	[%]
Y_i	Forbrenningsutbytte.	[g/g]
MW_i	Molarvekt til gitt forbrenningsprodukt.	[g/mol]

Mengde CO, som en funksjon av tid, som vil gjøre en person bevisstløs eller ute av stand til selv å redde seg ut av situasjonen beregnes ved hjelp av likn. 40.

$$FED = \frac{\int Concentration _ dt}{Dosage_{incapacitation}} \quad (40)$$

der

FED Fractional Effective dose.

Det kan antas at for verdier av $FED < 1$ vil personen selv være i stand til å rømme for $FED > 1$ vil personen være bevisstløs eller ute av stand til å rømme.

Konsentrasjonen av CO kan beregnes ved å benytte et uttrykk av Stewart. [8]

$$D' = 3,317 \cdot 10^{-5} (ppmCO)^{1,036} (RMV) \quad (41)$$

Ved å kombinere likn. 40 og likn. 41 får man et uttrykk for hvor stor andel CO utgjør.

$$FED_{CO} = \frac{\int_0^t 3,317 \cdot 10^{-5} (ppmCO)^{1,036} (RMV) dt}{D} \quad (42)^*$$

Dosen, D, er en funksjon av RMV ved et bestemt tidspunkt og ikke fra brannen startet. D blir derfor behandlet som en konstant.

En reduksjon av mengden oksygen i lufta vil kunne virke sløvende dersom vol% synker tilstrekkelig. For å beregne FED-verdien for oksygen benyttes likn. 43.

$$FED_{O_2} = \int_0^t \frac{1}{e^{(7,98-0,528(20,9\%- \%O_2))}} dt \quad (43)^*$$

Karbonmonoksid er ikke spesielt giftig, opp til en konsentrasjon på 5 % er konsekvensen økt pustefrekvens selv om det ikke er nødvendig. Økt pustefrekvens fører til større inntak av andre giftige gasser. Ved konsentrasjoner høyere enn 5 % kan karbondioksid ha bedøvende effekter. For å beregne dødelig dose CO benyttes likn. 44 [8]:

$$FED_{CO_2} = \int_0^t \frac{1}{e^{(6,1623-0,5189\%CO_2)}} dt \quad (44)^*$$

Alle de bedøvende gassene virker inn på blodets evne til å frakte oksygen eller kroppens evne til å nyttegjøre seg av oksygenet.

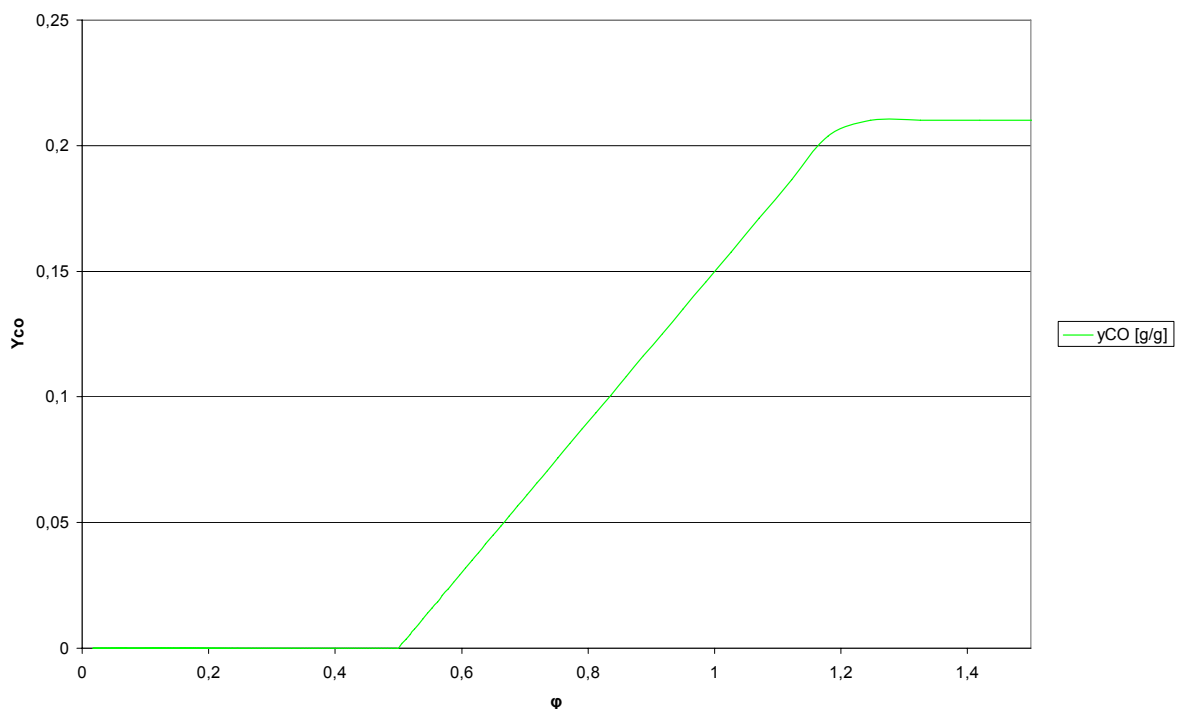
Det er en synergieffekt mellom karbonmonoksid, HCN og utarming av oksygen i røyken, mens karbondioksid påvirker hvor fort effekten av det bedøvende gassene inntreffer.

Likn. 45 uttrykker den totale dosen, bestående av O₂, CO og HCN, som vil gjøre en person bevisstløs eller ute av stand til selv å rømme

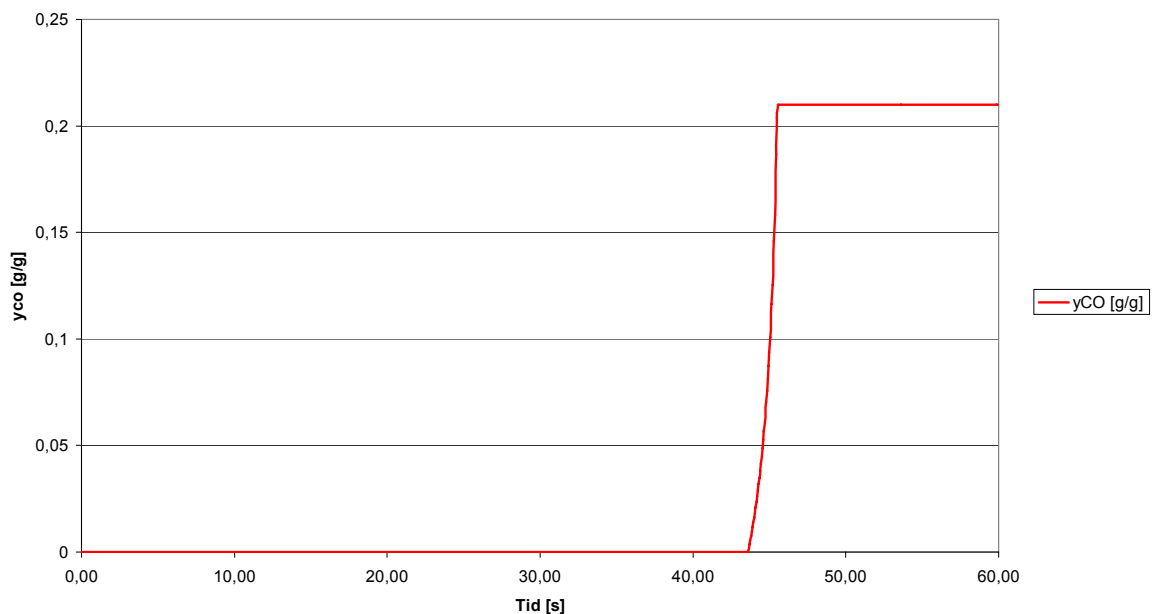
$$FED = FED_{O_2} + FED_{CO} + FED_{HCN} \quad (45)^*$$

5.4.Beregninger og resultater før overtenning.

Resultatene fra beregninger fra modelleringsmodellen fremstilles grafisk. Figur 9, Figur 10 og Figur 11 viser beregninger gjort for metanol. De to første modellene har en klar likhet med Figur 7.

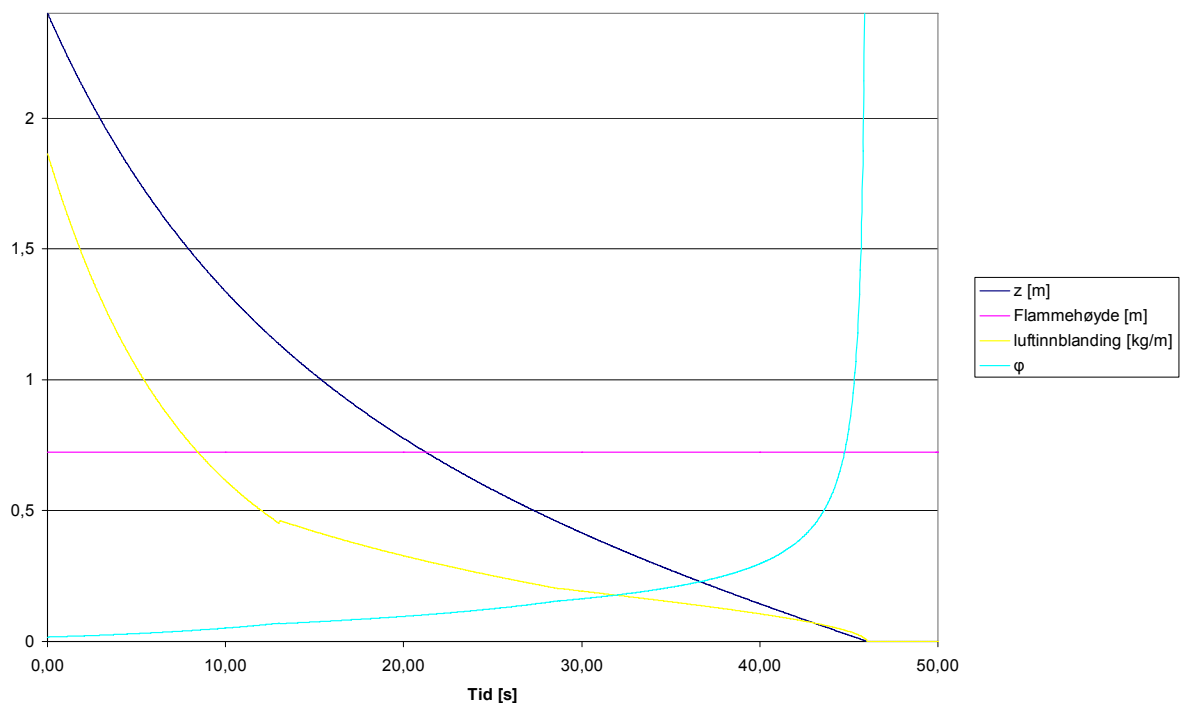


Figur 9: Utbutte av CO som en funksjon av ekvivalensraten, brensel metanol.



Figur 10: Utbytte av CO som en funksjon av tid, brensel metanol.

Ved å fremstille produksjonen av CO som en funksjon av tid er det lettere å se hvor lang tid det tar før kritiske forhold oppstår.



Figur 11: Div. resultater fra modeleringsmodell. Brensel metanol.

Figur 11 viser nedfyllingstiden av rommet, samtidig viser den hvordan ekvivalensraten endrer seg som en funksjon av nedfyllingstid og dermed som en funksjon av minkende luftinnblanding.

Tilsvarende kan det lett settes opp resultater for andre typer brensel.

5.5. Definisjon av overtenning

Tidspunktet for overtenning er av stor interesse etter som det er et sikkert tegn på at ulevelige vilkår har inntruffet i brannrommet og det er en markant økning i risiko for personer som måtte være i nærheten av brannrommet.

Overtenning defineres ofte som situasjonen hvor brannen går fra å involvere en begrenset del av det brennbare materialet i rommet til at alle rommets brennbare overflater brenner eller at det kommer flammetunger ut av rommets ventilasjonsåpninger.

Det er vanlig å sette følgende kriterier for overtenning:

- Temperaturen i det øvre laget ≥ 600 °C eller
- en tilbakestråling ≥ 20 Kw/m² ved gulvnivå.

Denne tilnærmingen er noe unøyaktig da den verken tar hensyn til hvilken brennbare materialer som er til stede i rommet eller rommets geografi.

Det er vanlig å kun ta hensyn til virkningen av CO, etter som CO er den viktigste dødsårsaken i brann. For eksempel vil inhalering av brannrøyk med en COkonsentrasjon på 0,15 % (1500 ppm) kunne medføre udyktiggjøring¹ i løpet av 30 minutter. LC₅₀² vil si at det er 50 % sannsynlighet for at død inntreffer. Den mengden CO en person har inhalert på 30 min blir i dette tilfellet definert som 1500 ppm*30 min = 45000 ppm*min, denne mengden betegnes ICT₅₀³, det er vanlig at denne verdien ligger mellom 35000-45000 ppm*min. [8]

5.6. Etter overtenning

Karbonmonoksidkonsentrasjonen øker kraftig etter overtenning. Det kan fort oppnåes en konsentrasjon på 70000 ppm i brannrommet like etter overtenning, denne konsentrasjonen kan være dødelig allerede etter bare 1 minutt. [9]

Eksempelvis er den kjemiske reaksjonen i likn. 46 eksoterm⁴ og er termodynamisk foretrukket. Allikevel reagerer ikke CO så lett med oksygen, det må derfor være andre faktorer som spiller inn, slik som f.eks. kinetikk.



¹ Udyktiggjøring: Personen blir ute av stand til å rømme bygget.

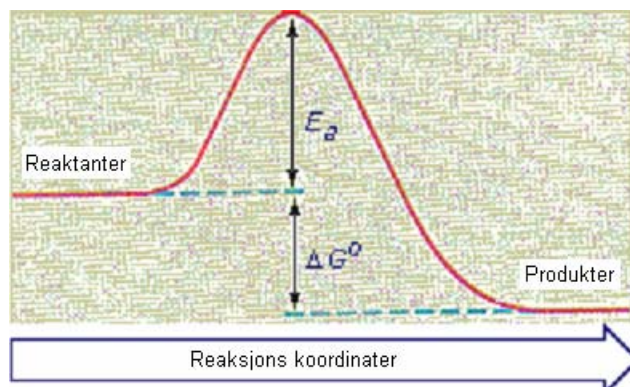
² LC₅₀: Lethal Concentration 50 %.

³ Incapacitation Concentration Time 50 %.

⁴ Eksoterm: frigjør varme.

5.6.1. Kinnetikk (E_A og ΔG):

Aktiveringsenergi har vanligvis betegnelsen E_A og har enheten joule. Aktiveringsenergi er den energien som trengs for å starte en kjemisk reaksjon, se Figur 12: Aktiveringenergi (E_A) og Gibbs Fri Energi (ΔG).



Figur 12: Aktiveringenergi (E_A) og Gibbs Fri Energi (ΔG).

For at en reaksjon mellom to stoffer skal gå må systemet ha tilstrekkelig energi, E_A. Dersom temperaturen stiger, øker energien til systemet.

For reaksjonen i likning 46 kreves det en aktiveringsenergi på E_A = 200 kJ/mol. [0]

Arrhenius likningen beregner sannsynligheten for at en bestemt reaksjon vil kunne forekomme under en gitt temperatur. Likning kan skrives:

$$\kappa = A \cdot T^b \cdot e^{-E_A/RT} \quad (47)^*$$

der

b Likningskonstant, gitt ut fra kjemisk reaksjon.

E_A Aktiveringsenergi. [kJ/mol]

R Gasskonstanten. [J/(molK)]

κ hyppighets konstant for reaksjonen/hastighetskonstant for reaksjonen.

A frekvensfaktor. A har en bestemt verdi for hvert enkelt reaksjonsforløp og er en størrelse som sier noe om sannsynligheten for at molekylene vil kollidere i riktig retning.

Ut fra fig 13 kan en da lese at CO ikke vil reagere noe særlig med O₂ ved temperaturer lavere enn ca 500 °C for reaksjonen i likn. 46.

I en reversibel kjemisk reaksjon vil forskjellen mellom ΔH og TΔS representere avgitt eller opptatt energimengde.

Gibbs reaksjonsfunksjon eller Gibbs fri energi sier om en reaksjon vil kunne gå i gitt retning og kan skrives slik:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (48)^*$$

der

ΔG	Gibbs fri energi	[J/mol]
ΔH	Entalpi ¹	[J/mol]
ΔS	Entropi ²	[J/(mol K)]
T	Temperatur	[K]

Denne energien representerer den drivende kraften i reaksjonen.

En negativ ΔG betyr at reaksjonen vil gå.

En positiv ΔG betyr at reaksjonen vil gå i motsatt retning.

En ΔG -verdi lik null, viser en likevekt som reaksjonen vil gå mot.

For reaksjonen i likn.46.

Får vi følgende:

$$\Delta H_{reaksj} = \sum \Delta H_{f,produkt} - \sum \Delta H_{f,reaktanter} \quad (49)$$

$$\Delta H_{reaksj} = (\Delta H_{f,CO_2} + \Delta H_{f,O}) - \left(\Delta H_{f,CO} + \frac{1}{2} \Delta H_{f,O_2} \right) \quad (50)$$

og

$$\Delta S_{reaksj} = \sum \Delta S_{produkt} - \sum \Delta S_{reaktanter} \quad (51)$$

$$\Delta S_{reaksj} = (\Delta S_{CO_2} + \Delta S_O) - \left(\Delta S_{CO} + \frac{1}{2} \Delta S_{O_2} \right) \quad (52)$$

Ved å benytte verdier fra tab. 4 blir verdiene:

$$\Delta H_{reaksj} = -33'000 \text{ J/mol}$$

$$\Delta S_{reaksj} = -28 \text{ J/(K*mol)}$$

Tabell 4: Properties of inorganic compounds. [10]

Formula	State	ΔH_f^\ominus [J/mol]	ΔS^\ominus [J/(K*mol)]
O	g	249'000	161
O ₂	g	0	205
CO	g	-111'000	198
CO ₂	g	-393'000	214

Ved å sette ΔG lik 0 kan en finne temperaturen hvor reaksjonen vil stoppe opp.

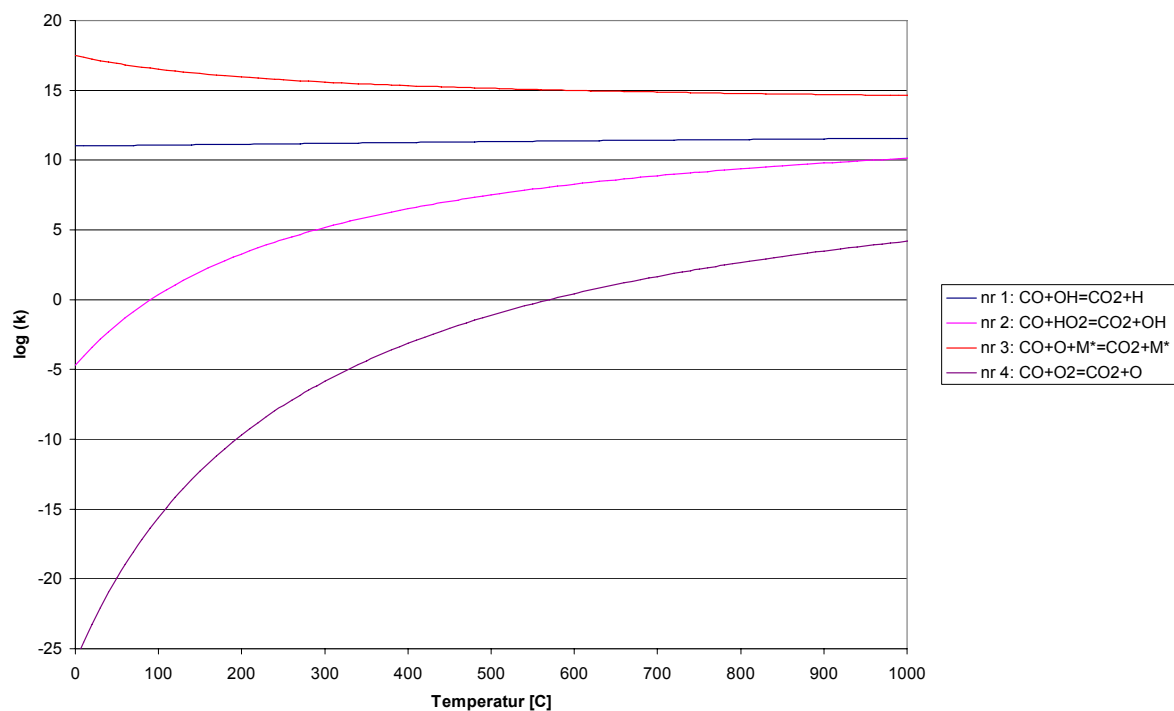
$$T = \Delta H / \Delta S = 1178,57 K = 905,42^\circ C \quad (53)$$

Ved lavere temperaturer enn dette vil CO reagere med O₂ dersom gassen har nok energi til å overskride grensen for aktiveringsenergien.

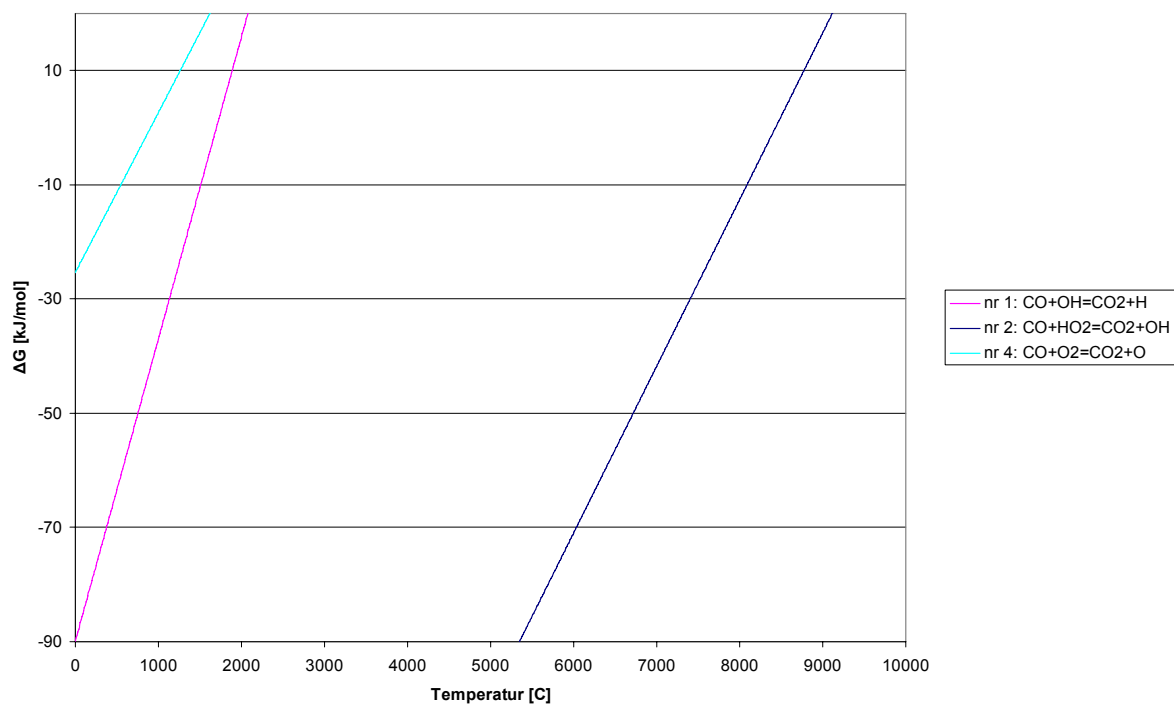
Det er flere reaksjoner som gjør at CO reagerer til CO₂. Noen eksempler er fremstilt i fig. 13 og fig 14.

¹ Dannelsesentalpien er den energiforandringen som er involvert når stoffer slår seg sammen og danner et eller flere nye stoffer.

² Entropien, S, i et system er målet på systemets uorden.



Figur 13: $\log(k)$ som en funksjon av temperatur.



Figur 14: ΔG som en funksjon av temperatur.

5.7.Resultater etter overtenning

Ved hjelp av ΔG og k kan en finne det teoretiske intervallet hvor CO vil reagere med O₂ og produsere CO₂. Men etter som det er flere måter for CO å reagere til CO₂ gir ikke disse beregningene oss et entydig svar utenat en har bedre kunnskap til hvilke komponenter som er til stede. Eksempelvis sier beregningene for reaksjonslikning 4 at CO vil reagere i intervallet ca 500 °C til ca 900 °C. Mens reaksjonslikning 1 og 2 sier at CO vil reagere i romtemperatur, men uten kjennskap til hvor mye det er av de forskjellige reaktantene er det ikke mulig å si hvor mye CO som vil reagere. Og dermed blir det bare antagelser.

Erfaringsmessig vet man at røyk med høy konsentrasjon av CO, som slipper ut av brannrommet ikke vil reagere noe særlig med oksygenet i omliggende rom. Og dette er et område som vil kreve mer nærgående undersøkelser.

6. Konklusjon

Utgangspunktet var at DBI ønsker å utvide simuleringsprogrammet Argos til å inkludere produksjon av blant annet CO og CO₂. Produksjon av CO og CO₂ blir i denne oppgaven satt opp som en funksjon av den globale ekvivalensraten. Vedlagt Excel arket inneholder et forslag til hvordan modellen kan programmeres, før overtenning. Resultatet fra reknearket samsvarer med målinger gjort av Gottunk og Roby.

Etter overtenning er det undersøkt hva som vil skje med CO etter at den slipper ut av brannrommet. Her gir ikke beregningene noe entydig svar. Dette er et område som krever mer spesifikk kunnskap til hver enkelt situasjon.

Referanser

1. John H. Klotz and James A. Milke. **"Design of Smoke Management systems"**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Condition Engineers, Inc, 1992.
2. National Fire Protection Association **"NFPA 101: Life safety code. 2000^{ed}"**, Quincy, MA: National Fire Protection Association.
3. Jon Richardsen, **"Akutt sykdom"**, 2. utgave, 1. opplag 2004, Gyldendal Norsk Forlag AS.
4. Jon Richardsen, **"Grunnleggen ambulansemedisin"**, 2. utgave, 1. opplag 2002, Gyldendal Norsk Forlag AS.
5. Bjarne Christian Hagen, **"Grunnleggende brannteknikk"**, kompendium fra 18. desember 2002.
6. Karlsson, Björn og Quiniere, James G. **"Enclosure Fire Dynamics"**, CRC Press, LLC, 2000 N.W Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431.
7. Zukoski, E.E., **"Development of a Stratified Ceiling Layer in the Early Stage of a Closed Room Fire"**, *Fire and Materiale*, Vol 2, No. 2, 1978.
8. Dr. Craig L Beyler, **"Fire Dynamics and Chemistry: An Engineering Approach"**, Huges Associates, Inc, 3610 Commerce Dr., Suite 817, Baltimore, MD 21227-1652.
9. Opstad. K og Stensaas, J.P., **"Håndbok i Branntekniske Analyser og Beregninger"**, SINTEF Bygg og Miljøteknikk – Norges branntekniske laboratorium, Trondheim 1998.
10. G. H. Aylward og T.J.V Findlay, **"SI chemical data, 2^{ed}"**, John Wiley and Sons.
11. J. Warnatz, U. Maas, R.W. Dibble, **"Combustion : physical and chemical fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation"**, 3rd edition, Berlin : Springer, c1996.
12. D. Drysdale, V. Babrauskas, S.J. Garyson, **"Fire Safety Journal"**, vol 18, no 3, 1992,
13. Aage Rogmsaa, **"Prosjektoppgaven"**, 2. utgave, Universitetsforlaget AS, Pb 508 Sentrum, 0105 Oslo.
14. Drysdale, Dougal: **"An introduction to fire dynamics"**, second edition, John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1 UD, England, 1998.
15. A. Murty Kanury, **"Introduction to combustion phenomena"**, Combustion science and technology book series ; vol. 2, New York : Gordon and Breach, 1975

16. Nelson P. Bryner, Eril L. Johnson William M. Pitts, “**Carbon monoxide production in compartment fires - reduced-scale enclosure test facility**”, NIST
17. Section 2/Chapter 4 “**SFPE Handbook 2nd**”, National Fire Protection Association, Inc. One Batterymarch Park, Quincy, Massachussets 02269.

Vedleggsliste:

CD med filene:

- CO₂ og CO produksjon. (Excel)
- E_A og ΔG. (Excel)
- Hovedprosjektrapport. (Word)